

УДК 550.837

О ВЛИЯНИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС УСТАНОВЛЕНИЯ ТОКОВ В ЗЕМЛЕ

Могилатов В.С.

Аннотация. Рассмотрена проблема взаимодействия магнитного поля Земли и вторичных токов в электроразведке методом зондирования становлением (ЗС). Показано, что это взаимодействие приводит к эффективной анизотропии проводимости и намагниченности горных пород.

Ключевые слова. Зондирования становлением, магнитное поле Земли, сила Лоренца.

Abstract. The problem of the interaction between Earth's magnetic field and the secondary currents in TEM (TDEM) is considered. It is shown that this interaction leads to an effective anisotropy of the conductivity and magnetization of rocks.

Key words. Transient soundings, magnetic field of the Earth, the Lorentz force.

ВВЕДЕНИЕ. Геоэлектромагнитные зондирования производятся на фоне постоянного магнитного поля Земли. Особого внимания заслуживают методы зондирования становлением (ЗС). Установление вторичных токов в земле, возбуждаемых при зондированиях с контролируемыми источниками, происходит в магнитном поле Земли, которое (~50 А/м) в тысячи и десятки тысяч раз больше вторичных магнитных полей, возбуждаемых при зондированиях становлением. Этот геомагнитный фон создает известные проблемы при измерениях, но, насколько известно автору, влияние его на сам процесс становления не обсуждалось. Вот это довольно-таки странно. В физике есть область знаний, где изучается движение заряженных частиц, составляющих ток, в скрещенных электрическом и магнитном (внешнем) полях. Речь идет о гальваномагнитных эффектах (например, известный эффект Холла [Кучис, 1990]).

Мы можем заметить проблему с совсем простой точки зрения. Все знают, что поле Земли поворачивает магнитную стрелку, которая является магнитным диполем. В больших масштабах первичное магнитное поле токовой петли, а также и поле вторичных токов установления можно считать полями диполей. Пока ток в петле не выключен, это можно сравнить с закрепленной магнитной стрелкой (рис. 1 а). Но когда ток выключен, возникает «плавающий» в проводящей геологической среде диполь. И он должен повернуться так же, как поворачивается магнитная стрелка (рис. 1 б). Мы готовы принести извинения читателю за столь «школьное» разъяснение, но мы хотели бы любыми средствами привлечь внимание к этой проблеме.

Конечно, весь вопрос в том, как быстро происходит дрейф и перестройка вихревых токов. Сравнимо ли это с длительностью процесса становления? По-видимому, искажения классического процесса установления не успевают развиваться значительно. В противном случае это было бы замечено давно. Кстати, общепринятая технология зондирования становлением предусматривает многократное на-

копление сигнала от разнополярных импульсов, и это может значительно нивелировать рассматриваемый эффект. Но не всегда и не полностью. Ниже мы будем предполагать, что геомагнитный эффект уже проявлял себя в полевых наблюдениях, но только эти проявления не интерпретировались соответствующим образом. Времена меняются, применяются все более сложные подходы к интерпретации (трехмерные) и необходимо учитывать все эффекты, влияющие на сигнал.

Следует еще заметить, что показанная возможность искажения общей картины распределения вторичных токов – это не единственное проявление магнитного поля Земли в процессе становления. Дрейф вторичных токов происходит в результате сложного движения отдельных носителей тока (заряженных частиц) под влиянием силы Лоренца и столкновений с другими частицами и с неподвижным скелетом. Круговые движения во внешнем магнитном поле (эффект Лоренца) не завершаются, но тенденция есть, и возникает дополнительный магнитный момент в направлении магнитного поля Зем-

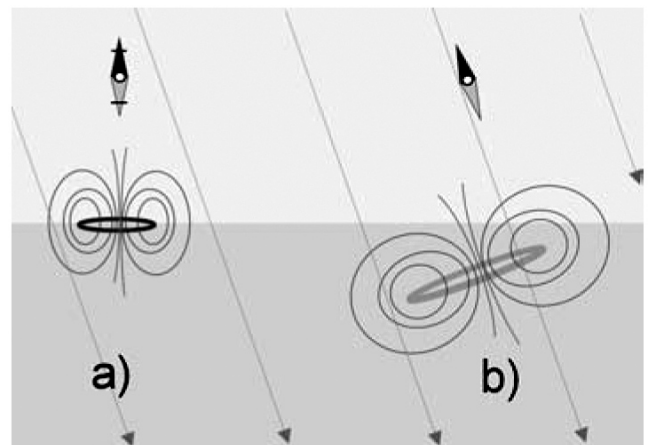


Рис.1.

Закрепленный и незакрепленный магнитные диполи в магнитном поле Земли

ли. Этот эффект (назовем его геомагнитным эффектом второго рода) слаб и, скорее всего, не заметен в традиционных методах ЗС. Но мы ниже рассмотрим специальную методику, где, возможно, этот эффект играет ключевую роль.

Некоторые теоретические факты

Рассмотрим и напомним некоторые теоретические сведения, имеющие отношение к геомагнитному эффекту в ЗС. Сначала продемонстрируем, что геомагнитное поле действительно велико в электродинамических масштабах зондирования становлением. Итак, поле Земли примерно 0,5 э или 35-55 А/м. Много это или мало?

На рис. 2 и 3 представлены кривые установления магнитных полей от токовой петли (индуктивный источник) и от кругового электрического диполя

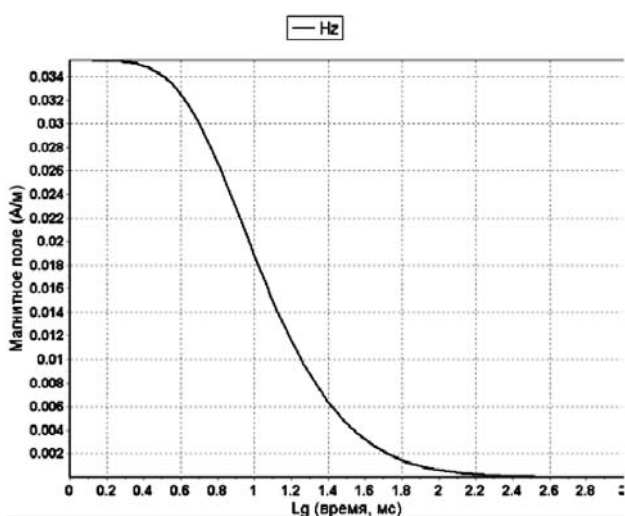


Рис.2.

Установление магнитного поля от токовой петли с током 100 А и радиусом 500 м. Среда – слой толщиной 1000м с сопротивлением 10 Ом * м на изолирующем основании. Компонента H_z на оси петли на глубине 500 м

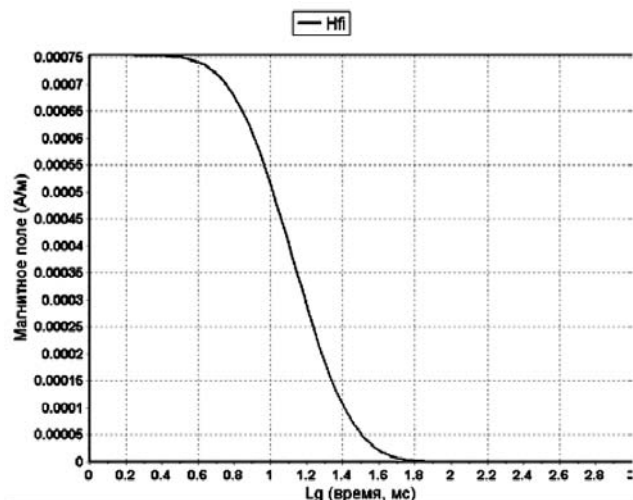


Рис.3.

Установление магнитного поля от кругового электрического диполя (КЭД) с током 100А и радиусом 500м. Среда – слой толщиной 1000м с сопротивлением 10 Ом*м на изолирующем основании. H на удалении 1000м от оси КЭД на глубине 500м

(КЭД, гальванический источник). В случае петли среднее значение магнитного поля 0,01 А/м, в случае КЭД – среднее значение всего лишь 0,0004 А/м. Действительно, магнитное поле Земли – мощный фактор, который только и ждет малейшего повода вмешаться в нашу «контролируемую» геоэлектродинамику.

А повод на самом деле есть. В физике известно взаимодействие тока и магнитного поля. Движущийся заряд – это ток, обладающий некоторым магнитным полем. Можно сказать, что в основе влияния внешнего магнитного тока на токи в сплошной среде лежит эффект Лоренца и сила Лоренца.

Для удобства читателя снова напомним хорошо известные факты из элементарной физики. Итак, сила Лоренца, действующая на движущуюся частицу-заряд в магнитном поле, есть

$$F = q \cdot [v \times B], \tag{1}$$

где $B = \mu_0 H$ – магнитная индукция.

Под воздействием этой силы заряд приобретает кроме поступательного – вращательное движение в плоскости, перпендикулярной магнитному полю (рис. 4). Радиус и угловая частота вращения:

$$r = \frac{m}{|q|} \cdot \frac{v \cdot \sin \alpha}{B}, \quad \omega = \frac{|q|B}{m}. \tag{2}$$

Отсюда следует, что все-таки есть воздействие на распределение вторичного тока со стороны магнитного поля Земли. Вторая сторона этого явления – возможность движения частицы в реальной среде. Понятно, что этот эффект чрезвычайно зависит от реального вещественного состава, микроструктуры среды, типа носителей заряда. Тем не менее, в принципе, возникает дополнительный магнитный момент вдоль внешнего магнитного поля. Сделаем оценку для электронного газа в металле (заряд электрона $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, концентрация $n = 10^{20}$ 1/м³):

- магнитная индукция поля Земли $B = 6,3 \cdot 10^{-5}$ Тл,
- среднюю скорость электронов (скорость тока)

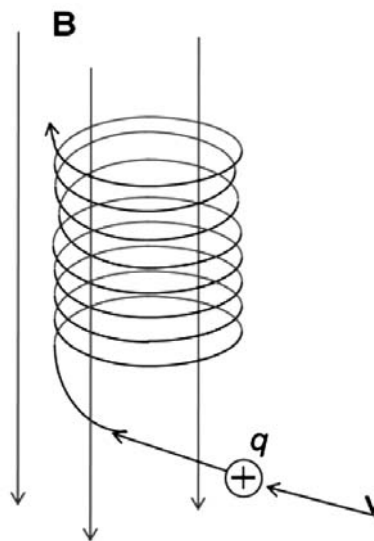


Рис.4.

Движение заряда в магнитном поле

примем, $v = 0,1 \text{ м/с}$,

- тогда лоренцов радиус для электрона $r = 0,9 * 10^{-8} \text{ м}$,

- частота вращения $f = 2,8 * 10^{10} \text{ 1/с}$,

- магнитный момент, создаваемый одним электроном $M_0 = 10^{-24} \text{ А * м}^2$,

- в одном кубическом метре образуется момент $M_1 = 10^{-4} \text{ А * м}^2$,

- в одном кубическом километре $M = 10^5 \text{ А * м}^2$.

Итак, образуется заметный магнитный момент. Таким моментом обладает токовая петля $100 \times 100 \text{ м}$ с током 10 А . И это уже в компетенции электроразведки ЗС, хотя пример, конечно, мало реалистичен.

Мы в этом примере допускаем, что круговое движение зарядов совершается без помех, но в реальной среде, а тем более в геологической среде, все намного сложнее. Круговое движение или движение по циклоиде не завершается из-за столкновений, частицы сложным образом дрейфуют под воздействием «своей» ЭДС и внешнего магнитного поля. Пусть электропроводность среды σ , плотность электрического тока j , и в соответствии с законом Ома

$$j = \sigma \cdot E. \quad (3)$$

При движении носителей в скрещенных электрическом и магнитном полях на носители заряда действует сила

$$F = q \cdot E + q \cdot [v \times B]. \quad (4)$$

Под действием этой силы носители дрейфуют в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям. В реальных средах, когда свободный пробег (расстояние, которое носитель проходит между двумя последовательными соударениями) носителей ограничен, в слабом магнитном поле соударения не дают возможности завершить движение по циклоиде. Уравнение движения носителей в этом случае имеет вид:

$$\frac{\partial(m \cdot v)}{\partial t} = -\frac{m \cdot v}{\bar{\tau}} + q \cdot E + q \cdot [v \times B], \quad (5)$$

где m - эффективная масса носителей заряда, $\bar{\tau}$ - среднее время свободного пробега. Решая уравнение движения, можно получить соотношение между скоростями по разным направлениям. Эту теорию можно развивать, и она развита для «хороших» сред (например, кристаллы). Но геологическая среда очень сложна. Параметр $\bar{\tau}$ - среднее время свободного пробега - весьма проблематичен для нашей пористой, многофазной, неоднородной на микро- и на макро-уровне среды. Тем не менее, мы можем сейчас сказать, что при наличии магнитного поля в тензоре электропроводности появляются недиагональные компоненты, обусловленные несопадением направлений электрического поля и тока. В этом случае связь тока с электрическим полем описывается тензорным уравнением:

$$j_i = \sum_{k=1}^3 \sigma_{ik}(B) \cdot E_k. \quad (6)$$

Таким образом, удельное сопротивление теперь имеет сложную структуру и значения, зависящие от величины и направления внешнего (земного) магнитного поля.

Этот неглубокий теоретический анализ все же приводит к определенным выводам. Во-первых, геомагнитный эффект приводит к некоторым эффективным анизотропии и намагнитченности первоначально изотропной, немагнитной среды (геомагнитные эффекты первого и второго рода). Во-вторых, мы видим, что геомагнитный эффект очень тесно связан с вещественным составом среды и ее микроструктурой. В-третьих, похоже, теория не скоро даст нам надежные количественные оценки, и в любом случае должна будет опереться на экспериментальные факты. Поэтому, оценку и изучение геомагнитного эффекта в ЗС можно скорее осуществить в экспериментах.

Проявления геомагнитного эффекта в ЗС

Посмотрим, что мы уже имеем пока без целенаправленных полевых экспериментов. Рассмотрим три проблемы (по оценке автора) в электроразведке ЗС, которые можно было бы пытаться решить, гипотетически привлекая геомагнитные эффекты первого и второго рода.

1. Зависимость сигналов установки АВ-q от ориентации. Лично автор получал не один раз из разных источников сообщения и свидетельства о такой систематической (геологические неоднородности вроде бы исключались) зависимости. Наиболее подробно автор ознакомлен с работами ООО «ТНГ-Казаньгеофизика», к которым он привлекался для консультирования. В организации разработана и применяется методика ЗС с линией АВ в качестве источника и регистрацией горизонтальной компоненты индукции, рис. 5. Приемно-питающая установка АВ-q, удобна при профильных работах. Однако она обладает повышенной чувствительностью к анизотропии окружающей среды.

Проблема выглядит весьма остро - в точках пересечения профилей значения суммарной продольной проводимости иногда различаются на 50-70%. Для точного выявления этого эффекта были организованы «крестовые» зондирования (4 ориентации установки на одной точке). Была замечена даже региональная тенденция. Предлагалось объяснение в виде сильной анизотропии горизонтальных сопротивлений в некоторых горизонтах, связанной с трещиноватостью. Региональные тенденции объяснялись большими подвижками с соответствующей ориентацией трещин. Но теперь возможно объяснение с

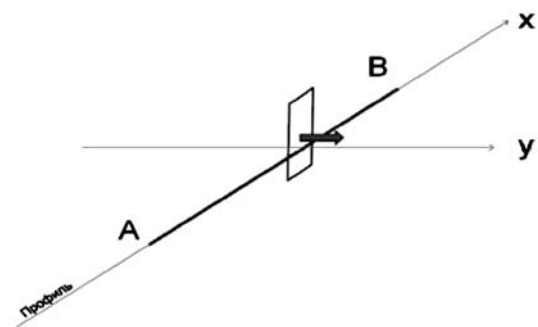


Рис.5.

Приемно-питающая установка АВ-q,

позиций геомагнитного эффекта. Недавно автор обратился в ООО «ТНГ-Казаньгеофизика» с просьбой сделать обзор работ на предмет корреляции сигналов с *географической* ориентацией. И такая связь в предварительном порядке подтверждена.

На рис. 6 (предоставлен геофизиком ООО «ТНГ-Казаньгеофизика» В.К.Шишкиным) представлены результаты трех таких зондирований в разных районах Татарстана. Рис.6 демонстрирует, что установки, ориентированные в широтном направлении определяют существенно большие значения кажущейся продольной проводимости (S_z), чем ориентированные в направлении Юг-Север. Сложность тут в том, что в каждом отдельном случае зависимость от ориентации можно объяснить неоднородностью среды, наклонными границами или рельефом. Необходимо собирать статистику. Впрочем, имеются аналогичные результаты и по другим участкам в Татарстане. Можно было бы попытаться на качественном уровне рассмотреть механизм воздействия магнитного поля Земли на устанавливающееся распределение вторичных токов линии и пояснить, почему именно северное направление дает меньшие значения суммарной продольной проводимости. Но сейчас нам важно привлечь внимание к проблеме.

2. Многоразносные зондирования. В 70–80-ых годах происходило бурное развитие метода зондирований в ближней зоне (ЗСБ). Казалось, неиз-

бежно будет создана конкурентоспособная (перед сейсморазведкой) электроразведочная технология с мощным фиксированным источником-петлей и обследованием отклика на обширной территории. Разрабатывались мощные источники тока и многоканальные измерительные комплексы. Однако этого не случилось. Сейчас разнесенные зондирования с источником-петлей делаются мало, разносы небольшие, и такие зондирования имеют вспомогательное значение. На наш взгляд, проблемы начинались на стадии интерпретации «сильно-разнесенных» кривых. По личному опыту автора, они часто оказывались искажены не интерпретируемым образом и очень плохо соответствовали одномерной модели, полученной по надежным центральным (соосным) зондированиям. В результате проваливалась самая первая стадия интерпретации – снятие одномерного фона. Объяснения сформировались разные – геологические неоднородности, отсутствие хорошего трехмерного подхода, неэффективность источника-петли, возбуждающего слишком большой изменчивый одномерный фон в отклике. Все это, конечно, имело место, а мы теперь добавим еще одну тему – искажения из-за геомагнитного эффекта, которые нивелируются в соосных зондированиях, но растут с разносом. Дело тут не в еще одном объяснении задним числом. Возможно, научившись вводить «геомагнитную» поправку в данные разнесенных ЗС,

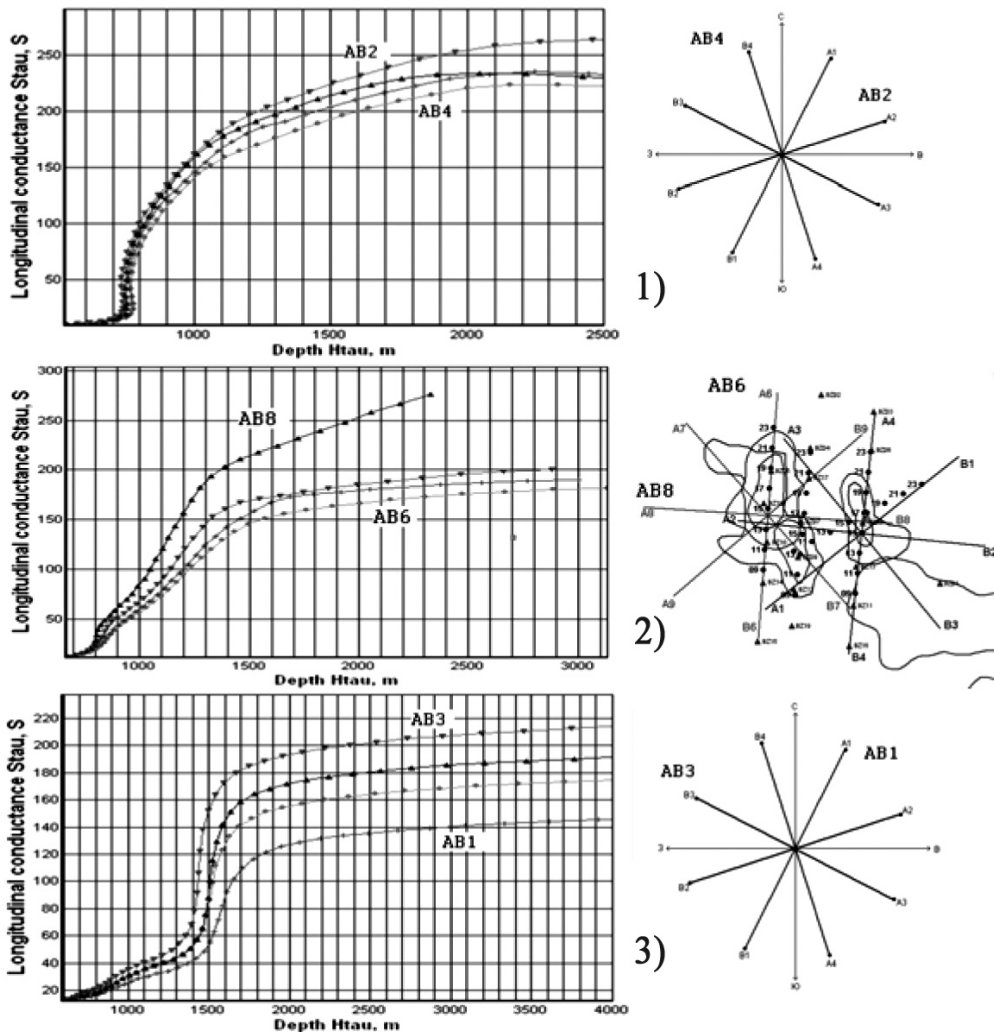


Рис.6. Кривые кажущейся проводимости (S_z) и схемы «крестовых» зондирований. Сапфировское поднятие – 1), Восточно-Халиковское поднятие – 2), Верхне-Сунгуровское поднятие – 3)

мы повысим эффективность таких зондирований, особенно, при использовании трехмерного подхода к интерпретации.

3. Интерпретация данных ЗВТ в работах на нефть. До сих пор мы подразумевали геомагнитный эффект первого рода. Теперь мы собираемся сообщить о подозрениях на проявление геомагнитного эффекта второго рода. Речь идет о данных нового метода импульсной электроразведки – зондирования вертикальными токами (ЗВТ). Метод основан на применении нового источника – кругового электрического диполя (КЭД) (рис. 7). В теоретическом отношении КЭД является наземным аналогом вертикального электрического диполя (ВЭД) и возбудителем поля ТМ-поляризации. С практической точки зрения такая конфигурация питающего тока обеспечивает компенсацию магнитного отклика вмещающей среды на дневной поверхности. Авторы метода рассчитывали лучше решать традиционную задачу электроразведки – выделение и оконтуривание латеральных неоднородностей проводимости. В случае рудной электроразведки это вполне оправдалось, и трехмерное (по проводимости) математическое моделирование подтверждает полевые данные.

Однако при нефтепоисковом применении ЗВТ обнаружился довольно загадочный, хотя и крайне благоприятный экспериментальный факт. В целом ряде работ (последние – в 2011) залежи нефти проявляют себя в площадном сигнале ЗВТ областью повышенных значений ЭДС одного знака (измерения dB/dt индуктивным датчиком) [Балашов и др., 2011]. Контур отмечался сменой знака. Вот, например, на рис. 8а представлен площадной рельеф сигнала на времени 200 мс на Шадкинском участке (Татарстан). Выделенная зона положительного сигнала ЗВТ согласуется с имеющимися скважинами и данными геохимических методов. Замечательно то, что эта площадная картинка мало меняется со временем до самых малых времен (рис. 8 г). Соответственно, кажущийся разрез вдоль обозначенного профиля (рис. 8 в) выявляет субвертикальный объект, «исходящий» из самой залежи (напомним, что в магнитном сигнале ЗВТ имеется информация только о неоднородности, а вмещающий геоэлектрический

разрез, полученный по другим данным, показан в таблице на рис. 8 б).

Такой результат (контур нефтеносности) вполне ценился заказчиками, но, конечно, нуждался в объяснении и дальнейшей интерпретации. В результате многолетних упорных попыток в этом направлении с применением трехмерного моделирования удалось установить:

- 1) отклик генерируется не самой залежью, а вертикально протяженной областью среды над залежью – ореолом, что и демонстрирует рис. 8;
- 2) даже хитроумные модели распределения проводимости в залежи и ореоле не объясняют (устойчивый, в большом диапазоне времен) однополярный сигнал над ореолом (впрочем, изменения проводимости в ореоле весьма сомнительны);
- 3) представление ореола зонами аномальных значений параметров ВП (в модели Cole-Cole) также приводит к двуполярному сигналу над ореолом.

Собственно, анализ площадных сигналов показывает, что объем среды, занятой ореолом, в процессе становления приобретает магнитный момент, «намагничивается» в вертикальном (или близком к этому) направлении. Это выглядело странно, потому что КЭД возбуждает в земле только горизонтальное магнитное поле (H_ϕ), но, в конце концов, навело на мысль о земном поле, которое в наших широтах почти вертикально (наклонение 70°), и на геомагнитный эффект, который преобразует постоянное действие магнитного поля Земли в переходный магнитный момент ореола.

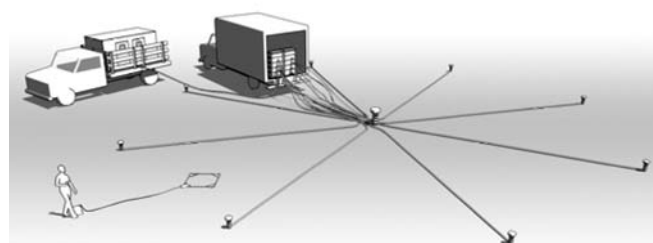


Рис.7.
Схема работ методом ЗВТ

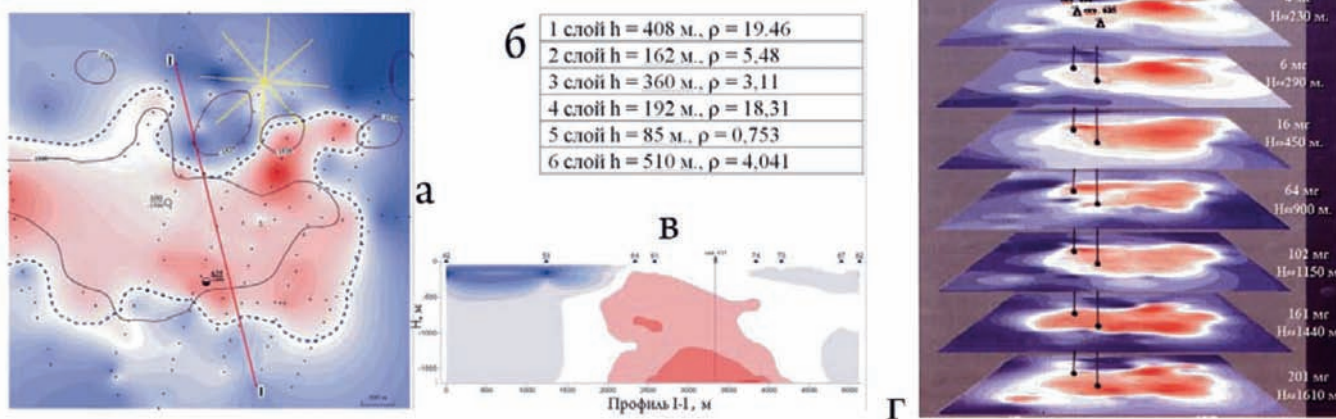


Рис.8.

Карта изолиний сигнала ЗВТ на Шадкинском поднятии на времени 200 мс (а), вмещающий разрез (б), кажущийся разрез по сигналам ЗВТ (в) и карты изолиний на разных временах (глубинах)

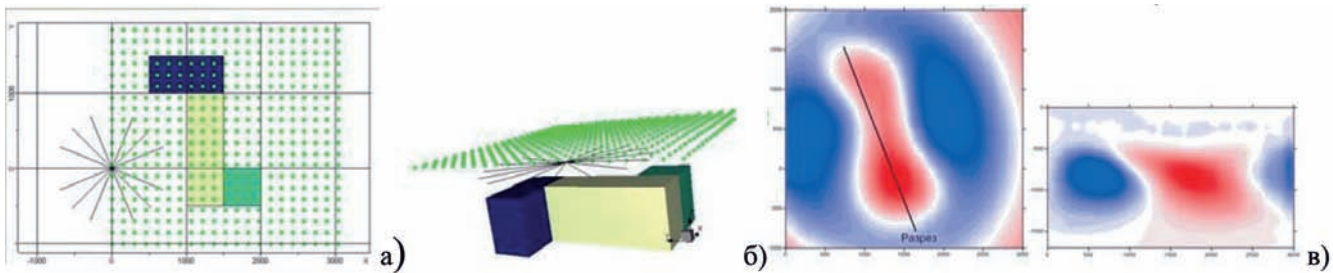


Рис.9.

Модель «активной» области (а), площадной сигнал на определенном времени (б) и кажущийся разрез (в)

Основываясь на таких представлениях, можно построить некоторый математический аппарат, связав возникающий в среде магнитный момент с плотностью тока посредством особого коэффициента (K_{hc}), который отвечает за геомагнитный эффект и отражает соответствующие свойства среды. Его значение определяется эмпирически, и предполагается, что в ореоле миграция углеводородов приводит к каким-то изменениям на микро-уровне так, что этот коэффициент сильно меняется. Итак,

$$dM_z = K_{hc} \cdot j_z \cdot dx \cdot dy \cdot dz,$$

причем, мы ограничиваемся учетом эффекта только от вертикального тока (его вклад преобладающий). Соответствующий член можно учесть в уравнениях Максвелла, но мы используем нормальное (в одномерной вмещающей среде) распределение тока (т.е., используем линейное приближение). Далее мы учитываем вклад образующегося распределения вертикальных магнитных моментов в процесс становления и определяем аномальный (он же и полный для установки КЭД) сигнал на дневной поверхности. Этот математический аппарат позволил провести моделирование, которое оказалось вполне адекватным в пространственно-временных характеристиках полевых сигналам ЗВТ в работах на нефть. На рис. 9 дан пример такого моделирования.

В заключение этого раздела напоминаем читателю, что этот эффект имеет место в той или иной степени, разумеется, в любом методе электроразведки, но возможность его наблюдения появляется только в ЗВТ, поскольку в этом методе компенсируется нормальный фон (отклик от вмещающей среды) посредством специального устройства источника (стороннего тока).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Как мы уже заметили выше, замкнутую теорию геомагнитного эффекта в зондированиях становлением вряд ли удастся построить в ближайшее время. Основная трудность тут в сложности геологической среды. Как нам кажется, сейчас наиболее быстрый путь к утилизации геомагнитного эффекта состоит в проведении полевых экспериментов с линией АВ и токовой петлей. Это можно сделать без особых затрат, в процессе текущих электроразведочных работ. Особый интерес представляют морские работы, где часть среды (морская вода) хорошо известна во всех смыслах и однородна.

В заключение снова обращаем внимание на реальную физическую подоплеку геомагнитного эффекта, возможную его актуальность для традиционных методов. И, фактически, на сегодня он является

безальтернативным объяснением природы сигналов зондирований вертикальными токами в зонах распространения углеводородов.

Если актуальность геомагнитного эффекта будет доказана (мы признаем, что эта работа недостаточна), то, во-первых, его можно рассматривать как помеху, которую надо учитывать. Но суть, по нашему мнению, в другом. Природа предоставляет нам дополнительные возможности для глубокого изучения геологической среды электромагнитными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балашов Б.П., Мухамадиев Р.С., Могилатов В.С., Андреев Д.С., Злобинский А.В., Шишкин В.К., Стогний В.В. Оконтуривание залежей углеводородов зондированиями вертикальными токами // Геофизика. 2011. № 1. С.61-66.
2. Кучис Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь. 1990. 264 с.

РЕЦЕНЗЕНТ – доктор физико-математических наук Блох Ю.И.

ОБ АВТОРЕ



МОГИЛАТОВ
Владимир Сергеевич

Главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доктор техн. наук, профессор кафедры геофизики НГУ. Область научных интересов – физико-математические основы геоэлектрики с контролируемыми источниками.